

震災コンクリートガラを用いたプレキャストコンクリート製品の製造

北辻 政文

宮城大学食産業学部：TEL：022-245-1426, E-mail：kitatsuj@myu.ac.jp

1. まえがき

東日本大震災による震災廃棄物の処理について、「東日本大震災に係る災害廃棄物の処理指針(マスタープラン)」¹⁾では、コンクリートガラについては、建設資材と利活用することを示している。また、震災で発生したコンクリートガラは膨大な量であることから、一般的に利用される路盤材(RC40)以外にも震災復興で大量消費が期待できるコンクリート用骨材(以下、再生骨材という)としての利用が望まれている。

再生骨材はH、MおよびLの3つのランクがある。再生骨材Hはレディーミクストコンクリートに利用できるものの製造コストが大きいことや回収率が少ないことが課題となっており、大都市部を除けばほとんど利用実績はない。一方、再生骨材Mは、乾燥収縮や耐凍害性が小さいことから、地下構造に限定されている。しかし北辻ら²⁾は、プレキャストコンクリート製品(JIS A 5364)に限定利用すれば、再生骨材Mの利用は可能であるとしている。プレキャストコンクリート製品は、部材寸法が小さく乾燥収縮の影響を受けにくく、小ロット製造が可能であることから、品質のばらつきを少なくできること、耐凍害性について土木研究所³⁾より簡易試験方法が提案され、再生骨材を用いたコンクリートの耐凍性評価が容易にできることを理由としている。さらに、出所の不明なコンクリートガラから製造された再生骨材のアルカリシリカ反応は、評価することが難しく、対策として高炉セメントまたはフライアッシュを用いることを前提としている。

他方再生骨材Lは、水分管理が難しく、汎用的なRC製品へは利用が難しい。

そこで、本研究では既往の研究を踏まえ、東日本大震災で発生したコンクリートガラの復興資材としての利用を目的として、再生粗骨材M(以下震災再生粗骨材Mという)を用いたプレキャスト製品の実用性検証結果を報告するものである。

2. 震災ガレキの有効利用

(a) コンクリートガラ

震災で発生したコンクリートガラは、道路用コンクリート製品、コンクリート舗装版、津波により被災した家屋の基礎構造物、更に、取り壊しを予定しているコンクリートの住宅、ビル、工場等が発生源となる。

コンクリートガラには、海水塩分、土砂、陶磁器、石膏ボードや木片などの異物が混入していることが予想され、破碎・分級して建設資材として再生利用する場合には品質低下が懸念されるため、分別の徹底や、状況に応じて水洗浄の実施を行う必要がある。また、とくに注意すべき課題は、東京電力 福島第一原子力発電所の放射能漏れ事故による放射性物質による汚染であり、これについては放射線量を十分確認した上で再利用を行うことが必要である。

現在、コンクリートガラの多くは、自治体の2次仮置場



図-1 震災コンクリートガラ (仙台蒲生地区)



図-2 RCクラッシュラン (名取地区)

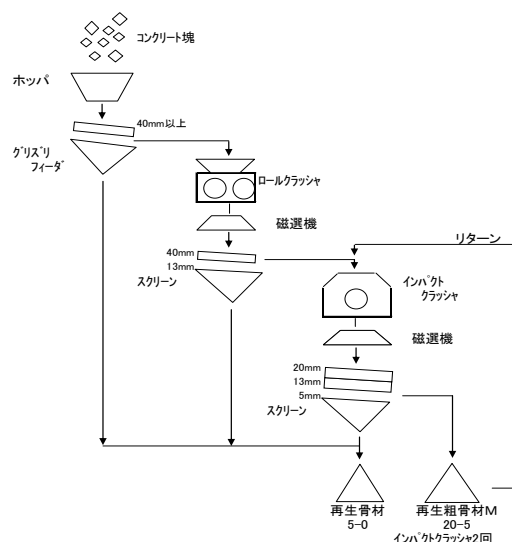


図-3 製造フロー

表-1 再生骨材の JIS 規格値

	乾燥密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	すりへり 減量 (%)	微粒分量 (%)	塩化物量 (%)	不純物量 (%)
再生粗骨材 H	2.5 以上	3.0 以下	30 以下	1.0 以下	0.04 以下	3.0 以下
再生粗骨材 M	2.3 以上	5.0 以下	—	1.5 以下	0.04 以下	3.0 以下
再生粗骨材 L	—	7.0 以下	—	2.0 以下	0.04 以下	—

に集積されており(図-1)、自治体によっては、コンクリート破砕機により RC クラッシュランを製造しているものもある。(図 2)。

(b)震災再生骨材 M の製造

震災再生粗骨材 M の製造フローおよび JIS 規格値を図-3、表-1 に示す。

この工程では、コンクリート塊をローラクラッシャーやジョークラッシャー等で一次破砕後、インパクトクラッシャーで複数回の二次破砕を行い、付着モルタルおよび微細クラックによる脆弱部分を除去している。一般的には、再生粗骨材 M の回収率は 50%程度である。これら破砕設備は、中間処理業者がすでに有している簡易的な破砕機のため、製造は容易である。

仙台市井戸地区の仮置場に集積されたコンクリートがらを用いて震災再生粗骨材 M を製造した。製造した震災再生粗骨材 M の外観を図-4 に示す。震災再生粗骨材 M には、木くずやビニール等の不純物の混入が確認された。

(c) 震災再生粗骨材 M の物性

①骨材中に含まれる塩化物イオン量測定

津波の影響により、骨材中に含まれる塩化物イオン量が多量であることが予想されるため、塩化物含有量試験(JIS A 1154, イオンクロマトグラフ法)を実施した。その結果、塩化物含有量は 0.0038%と規格値を満たしていた。これは、震災再生骨材への塩水の浸透が小さかったことや塩化物が降雨等によって洗い流されたものと推察される。

②震災再生粗骨材 M に含まれる不純物量試験

製造した震災再生粗骨材 M には様々な不純物が混入している。混入不純物は図-5 に示すとおり、木くず、ゴム、ビニールが多く混入していた。なお、不純物量は 0.69%と規格値を満足したが、比較的軽量な不純物のため、骨材製造後、風選除去が必要であると判断される。

③震災再生粗骨材 M の簡易凍結融解試験

気象条件の厳しい東北地方では、耐凍害性が高いことが必要不可欠である。再生骨材は、吸水率が高いためそれを用いたコンクリートは耐凍害性が低く、地下構造物のみの使用が認められている。しかし、土木研究所³⁾では、再生骨材の簡易凍結融解試験により耐凍性を判断できるとしている。そこで、本試験では、簡易凍結融解試験法により耐凍害性の判断を行った。本試験は、骨材を水中凍結(-20℃)16 時間ー水中融解(20℃)8 時間を 1 日 1 サイクルとして 10 日間行い、質量減少率が 10%未満の場合、耐久性指数は 60%以上、5.0%未満の場合、耐久性指数は 85%以上を確保できると判断するものである。

簡易凍結融解を行った骨材を図-6 に示す。粒径の異なる 4 種の震災再生粗骨材の質量減少率は、いずれも 1.9%となり、耐凍害性判断基準の 5.0%を大きく下回り、耐久性指数は 85%以上を確保できると判断された。

④震災再生粗骨材 M の品質

製造した震災再生粗骨材 M の品質を表-2 に示す。一般的に震災再生粗骨材 M は、付着モルタルの影響から密度および吸水率の JIS 規格を満たすことが困難と言われている^{3),4)} が、今回製造した震災再生粗骨材 M は、全ての項目で JIS 規格を満たした。これは、二次破砕を複数回行うことにより、微細クラックや脆弱なモルタルを除去したこと



図-4 震災再生粗骨材 M の外観



図-5 再生粗骨材 M の混入不純物



図-6 簡易凍結融解試験に用いた骨材

よると考えられる。

⑤震災再生粗骨材 M の安全性(放射能汚染)

福島第一原子力発電所の事故を受け、骨材の放射能濃度をヨウ化ナトリウムシンチレーション NaI(Tl)検出器放射能測定装置 GDM-15 で計測した。測定核種はヨウ素 131, セシウム 134, セシウム 137 の 3 項目である。土木資材の環境基準は、経済産業省の砕石出荷基準濃度 100Bq/kg が用いられることが多い。測定結果を表-3 に示す。ヨウ素は半減期が短く検出されなかったが、セシウム 134, および 137 が検出されたものの、いずれも基準濃度 100Bq/kg を大幅に下回り、安全性が確認された。

表-2 震災再生粗骨材Mの品質

			試験値	JIS 規格値
ふるい分け (FM)			6.69	-
密度	表乾	g/cm ³	2.50	-
	絶乾	g/cm ³	2.40	2.3 以上
吸水率		%	4.20	5.0 以下
微粒分量		%	0.58	1.5 以下
塩化物量		%	0.0038	0.04 以下
不純物量		%	0.69	3.0 以下
単位容積質量		kg/ℓ	1.42	-
実積率		%	59.1	-
簡易凍結融解		%	1.9	5.0 以下

表-3 再生粗骨材Mの骨材の放射能濃度

放射能濃度 (Bq/kg)		
放射性核種	測定値	検出下限値
Cs-134	4.5	2.3
Cs-137	3.7	2.8
計	8.2	—

表-4 BB①の使用材料

材料名	種類・品名	密度 (g/cm ³)	備考
セメント	高炉セメント	$\rho_c=3.04$	比表面積 (cm ² /g) : 3840
細骨材	砕砂	$\rho_s=2.67$	吸水率 (%) : 0.73
粗骨材	再生粗骨材 M	$\rho_R=2.53$	吸水率 (%) : 4.80
混和剤	AD 高性能減水剤	$\rho=1.06$	—
	AE AE 剤	$\rho=1.015$	—

表-5 BB①に使用した市販再生骨材Mの品質

試験項目	試験値	再生粗骨材 M JIS 規格値
最大寸法 mm	20	—
密度 g/cm ³	表乾	2.53
	絶乾	2.42
吸水率%	4.80	5.00 以下
微粒分%	0.29	1.5 以下
不純物%	0	3.0 以下
塩化物%	0.008	0.04 以下
粗粒率%	6.33	—

表-6 BB②の使用材料

材料名	種類・品名	密度 (g/cm ³)	備考
セメント	高炉セメント	$\rho_c=3.04$	比表面積 (cm ² /g) : 3840
細骨材	砕砂	$\rho_s=2.67$	吸水率 (%) : 0.73
粗骨材	再生粗骨材 M	$\rho_R=2.50$	吸水率 (%) : 4.20
混和剤	AD 高性能減水剤	$\rho=1.06$	—
	AE AE 剤	$\rho=1.015$	—

3. 震災再生粗骨材Mを用いたコンクリート実験

(a) コンクリートの種類

本研究では、震災再生粗骨材 M と高炉セメント B 種またはフライアッシュを用いたコンクリートを作製し、強度

表-7 F Aの使用材料

材料名	種類・品名	密度 (g/cm ³)	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15	比表面積 (cm ² /g) : 3340
細骨材	砕砂	2.58	吸水率 (%) : 1.08
粗骨材	再生粗骨材 M	2.40	吸水率 (%) : 4.20
混和剤	AD フライアッシュ	2.33	—
	高性能減水剤	1.24	—
	AE AE 剤	1.065	—

表-8 コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	F	S	G	AD	AE
BB①	40	38.0	158	375	—	671	1058	2.2	0.01
BB②	43	45.1	160	381	—	800	973	1.38	0.02
FA	40	47.4	170	395	85	780	813	4.32	1.5

特性および耐久性の観点から検討を行った。コンクリートの作製は3か所のプレキャストコンクリート製品工場において行った。まず、製品工場①では市販の再生粗骨材 M と高炉セメント B 種を用いてコンクリート(以下 BB①という)の性能を確認し、続いて、製品工場②では震災再生粗骨材 M と高炉セメント B 種(以下 BB②という)、製品工場③では震災再生粗骨材 M とフライアッシュを組み合わせたコンクリート(以下 FA という)を作製した。

高炉セメントおよびフライアッシュ等の混合セメントは、初期強度の発現が小さいことから、促進養生を行うプレキャストコンクリートには用いられることが少ないが、本研究では、アルカリシリカ反応の抑制対策として高炉セメント B 種およびフライアッシュを用いた。また、既往の研究ではフライアッシュには未燃カーボンが含まれるため、AE 剤を吸着して空気が連行しにくいという報告がある⁵⁾。その対策として、フライアッシュを用いた配合では混和剤としてプレフォーム型 AE 剤⁶⁾を用いた。

(b) 使用材料

BB①, BB②および FA に用いた材料を表-4~7, に示す。

セメントには高炉セメント B 種および普通ポルトランドセメントを用いた。混和材はフライアッシュ原粉を用いた。細骨材には各工場で用いる砕砂 (S)、粗骨材には市販の再生粗骨材 M (G)、および震災再生粗骨材を用いた。また FA の配合では、プレフォーム型 AE 剤を用いた。プレフォーム型 AE 剤は混練前にムース状の気泡を生成し、これをフライアッシュコンクリートに添加することにより、空気量のコントロールが容易になるものである⁶⁾。

震災再生粗骨材 M は表-2 に示す骨材を用いた。

(c) コンクリートの配合

本研究で用いたコンクリート配合を表-8 に示す。配合設計は、プレキャストコンクリート工場で用いられている配合を基準とし、30N/mm²を満足するための水セメント比とした。また、BB①および BB②のスランブを 12±2.5cm、空気量の範囲 4.5±1.5%を基準とした。FA については、スランブフロー65cm、空気量 5.0%を目標とした。

コンクリート物性試験および耐久性試験として以下を実施した。

①圧縮強度試験 (JIS A 1108), ②曲げ強度試験 (JIS A 1106), ③引張強度試験 (JIS A 1113), ④静弾性試験 (JIS A 1149), ⑤凍結融解試験 (JIS A 1148), ⑥乾燥収縮試験 (JIS A 1129-2), ⑦中性化促進試験 (JIS A 1153), ⑧製品の曲げ強度試験 (JIS A 5372)。

(d) 試験結果

①フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状を表-9に示す。試験値はいずれも目標範囲内であった。

②圧縮試験結果

圧縮試験結果を表-10に示す。初期強度(1日)において, BB①は15.1 N/mm², BB②は12.0 N/mm², FAは17.2 N/mm²であり目標値の12 N/mm²をすべて満たした。また出荷材齢である14日強度においては, BB①は39.4 N/mm², BB②は37.3 N/mm², FAは41.4 N/mm²と目標値の30 N/mm²を満たした。とくにBB①およびFAの強度が高かったのは, 水セメント比の影響と推察される。

③曲げ強度及び引張強度試験結果

曲げ強度, 引張強度試験結果を図-7, 図-8に示す。BB①の曲げ強度は4.6 N/mm², 引張強度3.5 N/mm², BB②の曲げ強度は4.5 N/mm², 引張強度3.2 N/mm², FAの曲げ強度は5.0 N/mm², 引張強度3.7 N/mm²となり, FAの値がわずかに高い値を示した。一般に普通コンクリートでは, 曲げ強度は圧縮強度の1/5~1/8, 引張強度は1/10~1/13の範囲にある。引張強度はいずれの配合においても一般的な範囲に入っている。

曲げ強度については, やや低い値ではあるが4.0 N/mm²以上を確認しており, 問題ない範囲であるものと判断される。

④静弾性係数

静弾性係数試験結果を図-9に示す。土木学会コンクリート標準示方書では, 設計基準強度(圧縮強度)が30 N/mm²の場合, 静弾性係数は28 kN/mm²としている。いずれの配合も土木学会基準よりわずかに小さい値となったが, 既往研究では, 再生粗骨材の置換率が高くなると静弾性係数が小さくなると報告されており^{7), 8)}, 本試験も同様の結果になった。

⑤凍結融解試験結果

東北地方で用いられる寒冷地コンクリートは, 耐凍害性が高いことが必要不可欠である。コンクリートに凍結融解作用が働くと, スケーリングやポップアウト等の劣化が生じる。このため, コンクリート(JIS A 1148)耐凍害性確認を目的として凍結融解試験を(JIS A 1148 A 法(水中凍結-水中融解))行った。

凍結融解試験結果を図-10, 図-11に示す。一般構造物のコンクリートでは, 300サイクル終了時の相対動弾性係数が60%以上の場合, 耐凍害性が高いと判断されるが, プレキャストコンクリートは小断面であることから, 劣化判定基準は85%と厳しい判定基準を設けている。BB①の相対動弾性係数は, 270サイクル終了時に85%を下回る結果となったが, BB②, FAは300サイクル終了時においても劣化判定基準を満足しており耐凍害性が確保できていると判断

できる。

表-9 フレッシュコンクリートの性状

配合名	スランプ(cm)	空気量(%)
BB①	13.0	6.0
BB②	14.5	4.5
FA	62.0	5.0

表-10 圧縮強度試験結果

配合名	1日強度(N/mm ²)	14日強度(N/mm ²)
BB①	15.1	39.4
BB②	12.0	37.3
FA	17.2	41.4
目標値	12.0	30.0

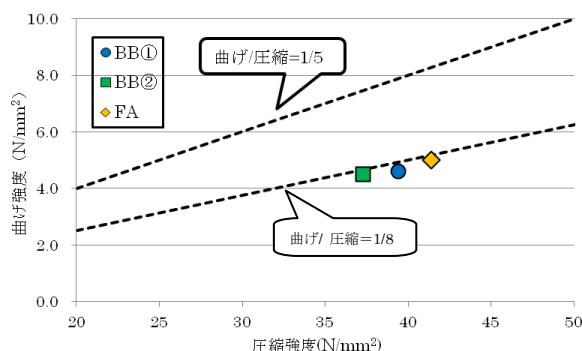


図-7 曲げ強度試験結果

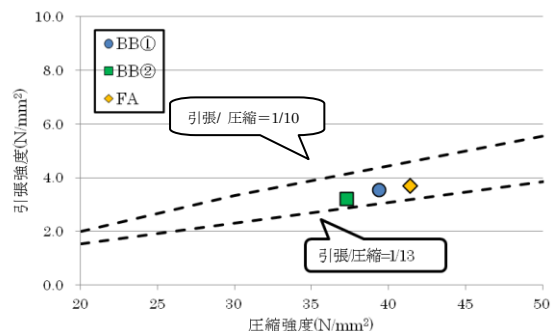


図-8 引張強度試験結果

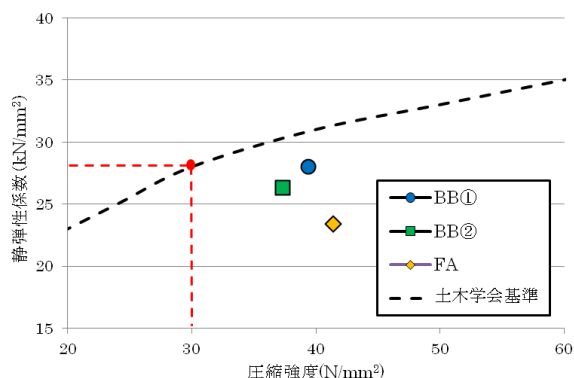


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係

BB①については, 空気量を高くすることにより対応可能と判断される。

質量減少率は, スケーリングやポップアウトなどの表面

劣化の指標ととらえることができる。図-11 より、300 サイクル終了時の質量減少率は、最大 2% 程度 (BB①) で、いずれのコンクリートも許容値の 3% を大きく下回る結果が得られ、良好であると判断できる。とくに FA の質量減少率が小さいと言える。

⑥ 乾燥収縮試験結果

吸水率が大きい再生骨材を使用したコンクリートは、普通コンクリートと比較して乾燥収縮が大きくなる傾向がある⁹⁾。また、一般的に高炉セメントを添加したコンクリートは、収縮率が大きくなると言われている。そこで、乾燥収縮試験結果を実施した。試験結果を図-12 に示す。なお試験では、蒸気養生後終了時、すなわち材齢 1 日を基準として長さ変化を測定した。

BB①に比べ、BB②および FA はやや大きい傾向にある。とくに材齢 13 週以降で大きくなっている。同時に 0.08% を超過していることが分かる。「RC 造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針」¹⁰⁾では、乾燥収縮率 0.08% 以下の場合、構造物に悪影響を及ぼさないと定義されている。このことから、今回試験に用いた BB②および FA に対しては収縮低減剤、膨張剤等の添加による乾燥収縮対策することが望ましいと判断される。しかしながら、本研究において想定しているプレキャストコンクリート製品は、道路の側溝や L 型よう壁であり、鉄筋による拘束力は大きくなく、また、製品寸法も最長で 2 m 以下であることから、乾燥収縮の悪影響を受けにくいと考えられるため、ひび割れの危険性は小さいと判断される。

⑦ 中性化促進試験結果

セメントが主成分のコンクリートは、水和反応の過程で強アルカリ性となる。ただし、長期的に大気にさらされると空気中の二酸化炭素とコンクリート中の水酸化カルシウムと反応し、徐々に炭酸カルシウムに変化する。この現象を中性化と呼び、中性化が進行し pH10 以下になるとコンクリート中の鉄筋を腐食させる危険がある¹¹⁾。また、小断面のプレキャストコンクリート製品では、十分なかぶり厚さを確保することが難しく、中性化が大きいコンクリートは、鉄筋腐食の危険性が更に高くなることが予想される。そこで中性化促進試験を実施した。試験結果を図-13 に示す。

BB①の中性化深さは他の 2 者に比べ若干大きい傾向にあるが、概ね同等と判断される。

一般的に、高炉セメントを用いたコンクリートは、中性化深さが大きくなる傾向がある¹²⁾。また、フライアッシュを用いたコンクリートは、ポゾラン反応によりカルシウムを消費するため、表層部の中性化進行は早いことが知られている。既往研究¹³⁾では、W/C を低くすることにより、中性化を抑制することが可能であり、長期的な中性化速度はポゾラン反応により低減可能であることも確認されている。普通コンクリートの試験データが無いが、本研究では、混合セメントを用いているため、普通コンクリートに比べ、水セメント比を小さくしており、普通コンクリートと同等であると推察される²⁾。

4. 震災再生粗骨材 M を用いたプレキャスト製品の試作

製造した製品は、L 型擁壁および落蓋式 U 形側溝である。いずれの供試体も型枠にコンクリートを詰め、テー

ブルパイブレタを用いて締固め、型枠のまま蒸気養生

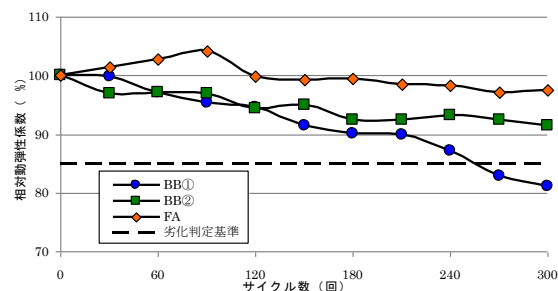


図-10 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

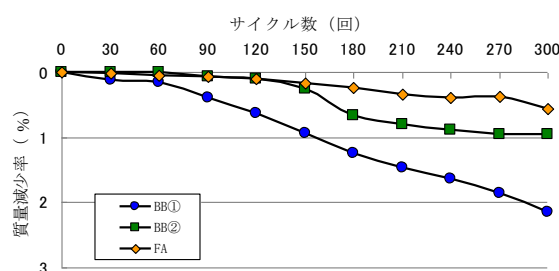


図-11 凍結融解試験結果 (質量減少率)

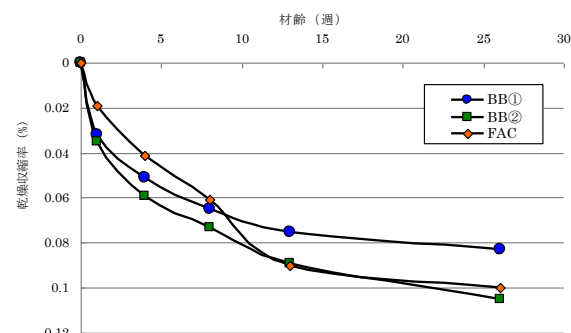


図-12 乾燥収縮試験結果

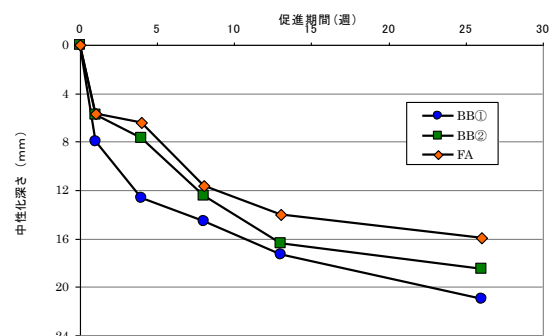


図-13 中性化促進試験結果

を行った。

形状寸法は、L 型擁壁 H1600×2.0m H1500×2.0m、落蓋式 U 形側溝 300×300×2.0m で、それぞれの外観を図-14、15 に示す。

いずれのプレキャストコンクリート製品もジャンカや砂ボロは見られず良好な外観を呈している。製品の曲げ強度試験においても JIS 規格値を満たし良好な結果であった。

L型擁壁は、歩道設置工事、道路拡幅工事、宅地造成工事などでの使用¹⁴⁾を目的としており、防災集団移転事業での有効利用が期待できる。

5. おわりに

本研究において、震災コンクリートからの復興資材として利用が可能であるということが実証できた。今後、震災再生粗骨材を製造するプラントを整備が必要である。とくに、運搬コストを考慮すると、各県の2次処理場へ設置することが望ましい。

また、復興工事は長期化するため、震災再生粗骨材Mのストックヤードの確保も重要である。

本研究が、東日本大震災からの復興の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 環境省 東日本大震災に係る災害廃物処理方針 (マスタープラン) について
http://www.env.go.jp/jishin/attach/haiki_masterplan.pdf
- 2) 北辻政文、丹野恒紀、吉田修栄、遠藤孝夫：再生粗骨材 M のプレキャストコンクリート製品への利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集 32 巻, 1 号, pp.1469 ~ 1474, 2010.7
- 3) 黒瀬英樹, 江本幸雄, 橋本紳一郎, 吉里哲郎：中品質再生骨材を用いたコンクリートの基礎的研究, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.781-782, 2008.9
- 4) 竹内博幸, 河野政典, 山田雅裕, 西浦範昭, 上西隆, 西山直洋：再生骨材コンクリートの実用化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.633-634, 2006.9
- 5) 陶山裕樹, 小山智幸, 小山田英弘, 伊藤是清, 松藤泰典：フライアッシュスラリーの品質管理に関する研究 (その 1 スラリー中の未燃カーボン量測定についての提案), 日本建築学会九州支部研究報告, 第 47 回, pp.29-32, 2008.3
- 6) 北辻政文, 青山宏昭, 齊藤和秀：フライアッシュコンクリートへのプレフォーム型 AE 剤の利用
- 7) 柳啓, 松井勇, 笠井芳夫：再生骨材コンクリートの静弾性係数に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1035-1036, 2000.9
- 8) 杉山一弥, 内山則之, 長谷川英規, 神山行男：解体コンクリートのコンクリート用骨材への適用に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 7 巻, 第 1 号, pp.91-101, 1996.1



図-14 L型擁壁 (BB②)



図-15 落蓋式U形側溝外観 (FA)

- 松村嘉之, 勝木太, 福田萬大：再生骨材がコンクリートのフレッシュ性状と乾燥収縮に与える影響, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.769-770, 2005.9
- 9) RC 造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針, 日本建築学会, 2006.2
- 10) 柳啓, 笠井芳夫, 加賀秀治, 阿部道彦, 池永博威, 細野知之：高炉セメントを使用した再生骨材コンクリートの品質に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.159-160, 1999.9
- 11) 森徹, 白山和久, 上村克郎, 依田彰彦：コンクリートの中性化と鉄筋の発錆について, 日本建築学会報告論文集, 第 103 号, pp.45, 1964.10
- 12) セメントジャーナル社：コンクリートの劣化と補修がわかる本, P11, 2005 年発行
- 13) ML ウォール研究会 <http://www.mlken.gr.jp/>